

**LOCALIZACIÓN Y DIMENSIONAMIENTO ÓPTIMO DE DISPOSITIVOS SVC
PARA LA COMPENSACIÓN DE POTENCIA REACTIVA EN SEP**

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de
INGENIERO ELÉCTRICO**

**TEMA:
LOCALIZACIÓN Y DIMENSIONAMIENTO ÓPTIMO DE DISPOSITIVOS
SVC PARA LA COMPENSACIÓN DE POTENCIA REACTIVA EN SEP**

**AUTOR:
Daniel Ángel Jácome Ávila**

**TUTOR:
Alexander Aguila Téllez**

Quito, Enero 2017

Daniel Ángel Jácome Ávila

**LOCALIZACIÓN Y DIMENSIONAMIENTO ÓPTIMO DE DISPOSITIVOS SVC
PARA LA COMPENSACIÓN DE POTENCIA REACTIVA EN SEP**

Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador 2017

Ingeniería Eléctrica

Breve reseña historia e información de contacto



Daniel Ángel Jácome Ávila (Y'1991-M'8). Realizo sus estudios secundarios en la Unidad Educativa Salesiana “Don Bosco” de la ciudad de Quito. Egresada de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo se basa en técnicas de modelamiento y simulación matemática orientada a la Localización y Dimensionamiento Optimo de Dispositivos SVC para la Compensación de Potencia Reactiva en SEP.

djacomea@est.ups.edu.ec

Dirigido por:



Alexander Aguila Téllez (Y'1981-M'09). Se graduó de Ingeniería Eléctrica en la Universidad de Camagüey Ignacio Agramonte Loynaz en Cuba. Msc. en Eficiencia Energética, actualmente está trabajando para lograr su título de Doctor en Ciencias de la Ingeniería. Es docente de la Universidad Politécnica Salesiana, miembro del grupo de investigación GIREI con énfasis en diagnóstico de fallas en sistemas eléctricos, sistemas de energías renovables, redes inteligentes, eficiencia energética.

aaguila@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados:

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con la autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos o investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

©2017 Universidad Politécnica Salesiana
QUITO-ECUADOR

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR/A

Yo, Ing. Alexander Águila Téllez, Msc. declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación *LOCALIZACIÓN Y DIMENSIONAMIENTO ÓPTIMO DE DISPOSITIVOS SVC PARA LA COMPENSACIÓN DE POTENCIA REACTIVA EN SEP* realizado por Daniel ángel Jácome Ávila, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, enero de 2017



.....

Alexander Águila Téllez

Cédula de identidad: 1755983184

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Daniel ángel Jácome Ávila, con documento de identificación N° 1003436589, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor/es del trabajo de grado/titulación intitulado: “Localización y dimensionamiento óptimo de dispositivos SVC para la compensación de potencia reactiva en SEP ”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Firma



.....
Daniel Ángel Jácome Ávila

1003436589

Quito, enero de 2017

AGRADECIMIENTO

Durante el transcurso de nuestra vida, nos proponemos retos y metas para alcanzar, y día a día escalamos logrando objetivos, que conseguimos con la ayuda y apoyo de personas que son muy importantes; razón por la cual dejo expresa constancia de profundo agradecimiento a cada una de ellas.

Primero, agradezco a Dios, ya que sin su ayuda no habría logrado cumplir mis presentes objetivos, quiero agradecer a mi padre Fabián que con su trabajo, ejemplo de perseverancia, sus enseñanzas de honestidad, que junto a mi madre Carmen del Rosario que con su honradez y espíritu de solidaridad, y juntos, aparte de haberme dado mi formación académica, me prepararon como persona trabajadora, perseverante y llena de virtudes, también quiero agradecer a mis hermanos Cristina y Josué, que con su apoyo, preocupación hacia mí y ejemplo de vida me han sabido guiar por el camino correcto, lo cual ha contribuido con este logro.

Agradezco también a la Universidad Politécnica Salesiana, en donde sus docentes me han facilitado el conocimiento, y sus experiencias transmitidas han logrado formar el profesional que soy.

Un profundo agradecimiento a mi tutor Msc. Alexander Aguila, que durante este tiempo con sus conocimientos y experiencias profesionales, me ha guiado y apoyado para lograr con la culminación de este trabajo de titulación.

INDICE GENERAL

Resumen.....	1
Abstract.	1
1. Introducción	2
2. Características de los DSTATCOM, D-FACTS y SVC en las Redes Eléctricas	4
2.1 Dispositivos de Compensación Estático para Distribución (DSTATCOM, por sus siglas en inglés).....	4
2.2 Sistemas Flexibles de Transmisión de Corriente Alterna para Distribución (D-FACTS, por sus siglas en inglés)	4
2.3 Dispositivos Estático de Potencia Reactiva (SVC, por sus siglas en inglés)	5
2.4 Comparación entre DSTATCOM, D-FACTS y SVC.....	5
3. Formulación del Problema	6
4. Análisis de Resultados	9
5. Conclusiones	13
6. Referencias.....	13
7. Estado del Arte.....	17

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Funcionamiento de un sistema eléctrico con dispositivos FACTS	3
Figura 2. Dispositivos DSTATCOM.	4
Figura 3. Dispositivos D-FACTS.....	5
Figura 4. Dispositivos SVC.	5
Figura 5. Modelado y proceso de una solución en GAMS.	6
Figura 6. Función de costos de instalación y de equipos SVC.	7
Figura 7. SEP IEEE 14 Barras.	8
Figura 8. Vpu sin compensar vs Vpu compensado con un dispositivo SVC.....	10
Figura 9. Sistema de la IEEE de 14 barras compensado con 4 dispositivos SVC.	11
Figura 10. Vpu sin compensar vs Vpu compensado con 4 dispositivos SVC.	11
Figura 11. Sistema de la IEEE de 14 barras compensado con 6 dispositivos SVC. ..	12
Figura 12. Vpu sin compensar vs Vpu compensado con 6 dispositivos SVC.	12

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Designación de variables para algoritmo.	9
Tabla 2. Algoritmo para la optimización, dimensionamiento y ubicación de dispositivos SVC.....	9
Tabla 3. Vpu del sistema eléctrico sin compensación de equipos SVC.....	10
Tabla 4. Comparación de Vpu sin compensar y compensado con un dispositivo SVC.....	10
Tabla 5. Comparación de Vpu sin compensar y compensado con 4 dispositivos SVC.....	11
Tabla 6. Ubicación y cantidad de MVAs de dispositivos SVC con un máximo de 4 dispositivos.....	11
Tabla 7. Comparación de Vpu sin compensar y compensado con 6 dispositivos SVC.....	12
Tabla 8. Ubicación y cantidad de MVAs compensado con 6 dispositivos SVC.	12
Tabla 9. Pérdidas eléctricas en los sistemas eléctricos sin compensación y con compensación.	13
Tabla 10. Matriz del Estado del Arte	17
Tabla 11. Resumen e Indicadores del Estado del Arte.....	20

LOCALIZACIÓN Y DIMENSIONAMIENTO ÓPTIMO DE DISPOSITIVOS SVC PARA LA COMPENSACIÓN DE POTENCIA REACTIVA EN SEP

Resumen.

En este artículo se presenta un modelo de optimización y de ubicación para un sistema eléctrico de potencia, con un modelo matemático de multi-objetivo para resolver el problema de variaciones de voltaje dando solución con una compensación de potencia reactiva con dispositivos FACTS SVC, de la misma forma la ubicación óptima de los dispositivos. El modelo matemático fue desarrollado en la herramienta GAMS teniendo la capacidad de hallar la ubicación adecuada y a la vez dimensionar la capacidad óptima de cada dispositivo SVC, minimizando los costos, las pérdidas y el índice de desviación de tensión, mediante un análisis del sistema eléctrico de potencia con las variaciones de voltaje en sus nodos teniendo mayor incidencia en los nodos con cargas, optimizando con las funciones objetivo y las restricciones necesarias, de esta forma tener un sistema eléctrico más estable y confiable para el consumidor con el uso de dispositivos SVC logrando a los menores costos posibles beneficiando al usuario.

Palabras Clave: Compensación de Potencia Reactiva, Estabilidad de voltaje, Redes de Distribución, SVC, GAMS.

Abstract.

In this article presents an optimization and location model for an electric power system, with a multi-objective mathematical model to solve the problem of voltage variations giving solution with a reactive power compensation with FACTS SVC devices, Same way the optimal location of the same. The mathematical model was developed in the GAMS tool with the ability to find the appropriate location and at the same time to size the optimum capacity of each SVC device, minimizing costs, losses and the voltage deviation index, through an analysis of the electrical system of Power with the variations of voltage in their nodes having greater incidence in the nodes with loads, optimizing with the objective functions and the necessary restrictions, in this way to have a more stable and reliable electrical system for the consumer with the use of SVC devices achieving The lowest possible costs benefiting the user.

Keywords: Reactive Power Compensation, Voltage Stability, Distribution Networks, SVC, GAMS.

1. Introducción

A lo largo del tiempo los sistemas eléctricos de potencia (SEP) que están conformados por una parte generadora, red de transmisión, red de distribución y consumidor (carga), han tenido varios inconvenientes como es la variación de voltaje en la redes eléctricas en lo cual las empresas que suministran el servicio eléctrico se han enfocado en dar una solución certera a estas variaciones de voltaje, por ende el suministro de energía eléctrica debe estar dentro de los estándares y las normas que se encuentren rigiendo en el país en el que se encuentren, siendo el abastecimiento de energía eléctrica el óptimo para el consumo, las redes eléctricas cumplen un papel muy importante en el suministro de energía eléctrica al usuario teniéndolas con varios niveles de voltaje, en este trabajo por motivos de simulación se va a basar en un modelo de SEP predefinido de la IEEE con el objetivo de tener niveles de voltaje con una tolerancia aceptable para la estabilidad de suministro de energía eléctrica. Para dar solución a estas variaciones de voltaje en las redes eléctricas se encuentran varias opciones como son los moderadores de voltaje, entre ellos se encuentra los bancos de capacitores fijos y regulables según sea la necesidad también se encuentra los reactores entre otros mecanismos para estabilizar el voltaje[1]–[4].

Todas estas medidas ayudaran al sistema eléctrico de potencia a tener los niveles de voltaje adecuados con un factor de potencia que este dentro de los niveles de tolerancia dando una estabilidad al suministro eléctrico[5]–[7].

Se obtiene muchas ventajas al tener una compensación de potencia reactiva en la red eléctricas tanto en transmisión como en distribución , donde se tiene las redes de distribución primarias y redes de

distribución secundarias, las redes de distribución primarias se encuentran los diferentes distribuidores del servicio eléctrico de cada país en los cuales se encargan de abastecer de energía eléctrica a los diferentes clientes como industriales o comerciales, se tiene también a las redes de distribución secundarias siendo de bajo voltaje, que ya son en sus totalidad del consumidor, es decir, de la carga satisfaciendo su demanda, teniendo en cuenta estos puntos de vista se conoce que las ventajas de una compensación en la redes de distribución primaria son variados como es el mejoramiento de los niveles de voltaje y de la misma forma se va a tener un mejor factor de potencia en la red[8]–[13].

Teniendo varios métodos para el mejoramiento de los perfiles de voltaje de la misma forma ir mejorando en par a la estabilidad del sistema, aumentado su confiabilidad, con el avance de la electrónica de potencia se ha logrado tener equipos especializados en dar una solución no solo a compensación de reactivos entre otros inconvenientes encontrados en las redes de distribución, teniendo dispositivos electrónicos que dan una solución en conjunto como son los Sistemas Flexibles de Transmisión de Corriente Alterna (FACTS, por sus siglas en inglés), donde permiten modificar los parámetros que definen a la red eléctrica que se encuentre con inconvenientes, este tipo de dispositivos tiene una alta capacidad de velocidad dando una versatilidad a las líneas de eléctricas llegando a varios objetivos como es la disminución de las oscilaciones y dando un soporte a las variaciones de voltaje con un mínimo tiempo de interrupción ayudando a dar una vigilancia al flujo de potencia que se esté dando en las redes eléctricas [14]–[18].

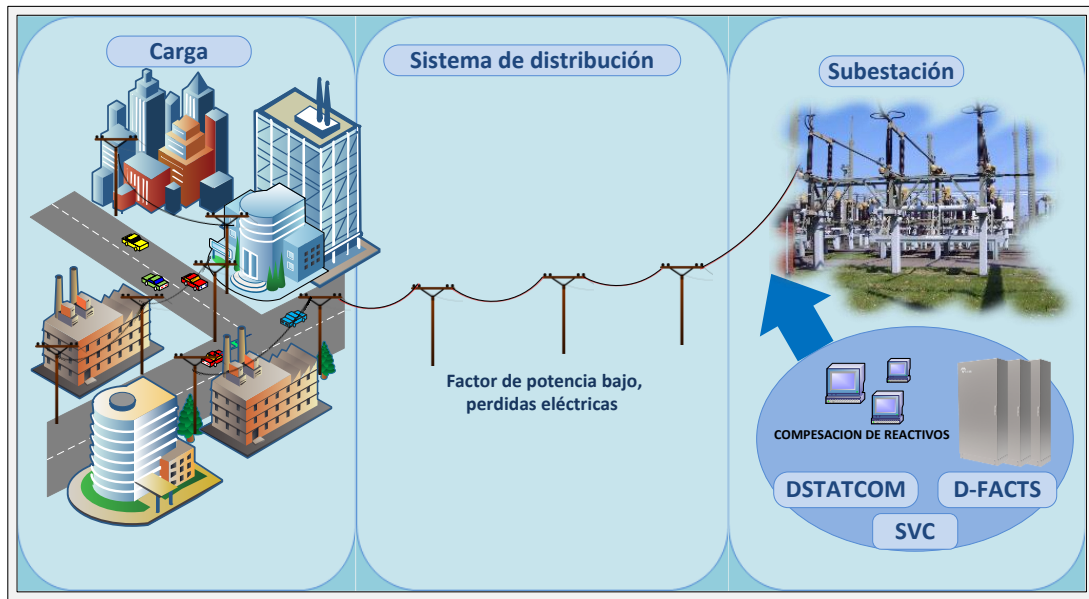


Figura 1. Funcionamiento de un sistema eléctrico con dispositivos FACTS

Se ha visto la necesidad de ir desarrollando dispositivos en específico para las redes de distribución, teniendo como resultado a los Sistemas Flexibles de Transmisión de Corriente Alterna para Distribución (D-FACTS, por sus siglas en inglés) que son dispositivos de naturaleza flexible de corriente alterna pero con características que estos dispositivos se van adaptando a la red de distribución[3], [17], [19]–[21].

Encontrando el desarrollo de otros dispositivos que cumplen con las principales características para mejorar la red así como el flujo óptimo de potencia en una red enmallada de distribución, en específico se tiene el avance y el estudio de los Dispositivos de Compensación Estático para Distribución (D-STATCOM, por sus siglas en inglés) siendo estos dispositivos estáticos de compensación, con el objetivo de mejorar los perfiles de voltaje de la red de distribución, logrando con una conexión a tierra y a los distintos dispositivos de conexión y desconexión, los DSTATCOM utilizan inversores trifásicos que funcionan como acoplamiento teniendo una transacción de corriente en adelanto y de atraso en el

sistema de distribución, este tipo de equipos son importantes en las redes de distribución pudiendo ser utilizados en vez de reguladores de voltaje o de banco de capacitores teniendo un ahorro económico y a la vez ahorro espacio, tomando en cuenta que la ubicación de este tipo de equipos sabiendo que es muy importante ya que con la ubicación adecuada se tendrá mayores ventajas a la red de distribución viendo reflejado en su funcionamiento y en costos[19].

Por último se encuentra a los Dispositivos Estático de Potencia Reactiva (SVC, por sus siglas en inglés), son dispositivos con la capacidad de ajustar para intercambiar potencia capacitiva o inductiva con el objetivo de estabilizar o la de controlar los parámetros específicos de los sistemas de distribución entregando mayor estabilidad y confiabilidad[13], [22].

En este artículo se buscara el mejoramiento de los perfiles de voltaje con una propuesta de un punto de vista sencilla y práctica basándose en los costos de implementación y de equipos, con base en la heurística y a la vez en la práctica se buscara una ubicación optima de todos los dispositivos en las redes

eléctricas, tomando en cuenta su capacidad de respuesta ante eminentes fallas eléctricas y de la misma forma la minimización de las pérdidas que se tienen y afectan al usuario, a la vez logrando la estabilidad en los perfiles de voltaje con una función objetivo de costos logrando los menores posibles llegando a una estabilidad de carga sin desniveles de voltaje con resultados favorables al usuario en costos y confiabilidad, esta propuesta será verificado en un modelo pre establecidos por la IEEE de 14 barras compensando con dispositivos FACTS[23]–[25].

2. Características de los DSTATCOM, D-FACTS y SVC en las Redes Eléctricas

2.1 Dispositivos de Compensación Estático para Distribución (DSTATCOM, por sus siglas en inglés)

Los dispositivos DSTATCOM ayudan a compensar la potencia reactiva que se encuentra en las líneas de distribución y a la vez dan la facilidad de actuar como un regulador de voltaje, el dispositivo funciona como un compensador fijo, es decir, estático donde no permite la variación de potencia reactiva que se va a inyectar en la red sabiendo que estos dispositivos se encuentran conectados de forma de derivación en el sistema, la cantidad de potencia reactiva estará dada por las especificaciones del equipo y también por las variaciones de la carga conectada[26].

Para ir controlando la potencia activa y de la misma forma la potencia reactiva en el sistema de distribución con los dispositivos DSTATCOM se realizó dando un control a las diferencias de los ángulos que se encuentra en la fase de las variaciones de las intensidades de voltaje, por ejemplo si el voltaje de salida de nuestro dispositivo DSTATCOM es un valor V_D y el voltaje nominal del

sistema como un valor V_n , entonces el valor de voltaje DSTATCOM V_D tiene mayor magnitud que el valor del voltaje nominal V_n , el DSTATCOM procede a inyectar potencia reactiva al sistema de distribución otorgando un equilibrio en el mismo, pero al tener lo contrario, es decir, si el voltaje V_D tiene menor magnitud que el voltaje V_n el DSTATCOM procede a consumir potencia reactiva del sistema de distribución, los dispositivos DSTATCOM son los encargados de normalizar el voltaje en la barra que se encuentre una conexión bien de la generación o de la carga teniendo la capacidad de dar generación de voltaje trifásico con una onda sinusoidal y a la vez que se encuentren simétricas con una frecuencia de 60Hz y de la misma forma con un ángulo y un módulo que se le puede ir controlando según sea la necesidad del sistema[27].

Se debe saber que un dispositivo DSTATCOM es una fuente de voltaje simplificada donde no posee una inercia teniendo como ventaja la velocidad de responder ante las irregularidades en el sistema eléctrico y por ende no se va a ver un efecto en la impedancia del sistema de distribución[28].

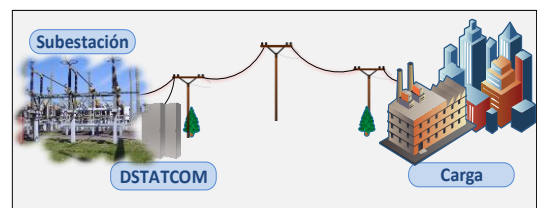


Figura 2. Dispositivos DSTATCOM.

2.2 Sistemas Flexibles de Transmisión de Corriente Alterna para Distribución (D-FACTS, por sus siglas en inglés)

Los dispositivos D-FACTS son dispositivos flexibles de corriente alterna para distribución, teniendo la capacidad de controlar el flujo de potencia reactiva

en las líneas eléctricas logrando un menor congestionamiento en ellas, los dispositivos DFACTS tienen la capacidad para incrementar el flujo de potencia, logrando el aumento de la capacidad de carga del sistema de distribución, una de las características de este tipo de dispositivos es la capacidad de ir adaptándose al sistema según sea la necesidad y la cantidad de potencia a inyectar que se necesite, otras de las características y a la vez beneficio que se tiene en los DFACTS es la de sujetar en las líneas eléctricas existentes sin tener la necesidad de ponerlos en serie a la red, es decir, sin cortar el conductor como lo se observa en la figura 3 ya que estos dispositivos se basan en el cambio de la impedancia del conductor en uso, que está circulando el voltaje en ese momento ayudando a descongestionar al sistema de distribución aumentando el flujo de voltaje de forma óptima por el conductor, se coloca al inicio y al fin de sistema de la línea eléctrica, logrando el aumento de confiabilidad en la red pues si falla un dispositivo al inicio de la línea el dispositivo que se encuentra al final lo va a poder suplir mientras el dispositivo dañado se reintegra al sistema, tomando en consideración que los costos de estos dispositivos son elevados[3], [5], [17], [29].

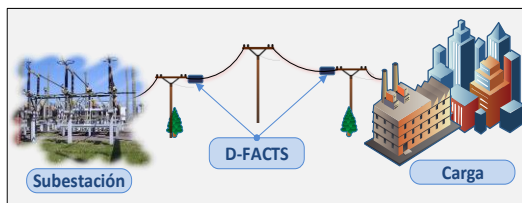


Figura 3. Dispositivos D-FACTS.

2.3 Dispositivos Estático de Potencia Reactiva (SVC, por sus siglas en inglés)

Los dispositivos SVC tienen como objetivo principal el control inmediato con los menores tiempos posibles para el voltaje del sistema en los nodos más

vulnerables de la red, funcionando como un generador de potencia reactiva, donde la salida se puede variar para un intercambio de potencia reactiva o a la vez inductiva, teniendo como característica principal de estos dispositivos su velocidad de respuesta, pero tomando en cuenta que los costos de instalación y del dispositivo SVC son elevados, la instalación de los dispositivos SVC se puede hacer en el punto medio de las líneas de distribución o en las áreas de las cargas como se aprecia en la figura 4[30], [31]. Se tiene varios tipos de SVC que son los TCR que es un reactor controlado por tiristores, también están los TSC donde tienen una capacidad conmutada por tiristores, este tipo de dispositivos se lo conecta en paralelo al sistema ya que los SVC son una combinación de varias fuentes de VAR conmutadas que están funcionando de forma coordinada con un sistema de control[22].

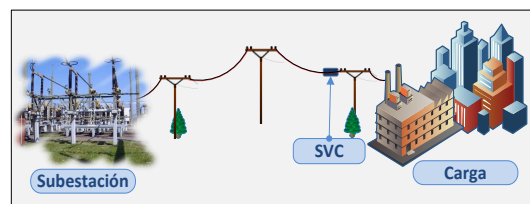


Figura 4. Dispositivos SVC.

2.4 Comparación entre DSTATCOM, D-FACTS y SVC

Los dispositivos DSTATCOM, D-FACTS y SVC tienen como beneficio en común el de compensar la potencia reactiva que está presente en el sistema de distribución y de esta forma aumentar la confiabilidad y la calidad del servicio eléctrico por parte de las empresas de suministro de energía eléctrica, pero teniendo grandes diferencias en los dispositivos ya señalados, los DSTATCOM son dispositivos estáticos síncronos encargados de inyectar potencia reactiva en la red al ser necesario tomando en cuenta que se tiene

una magnitud total fija de MVA para compensar, es decir, tiene una magnitud estática, al compensar con estos dispositivos la potencia reactiva presente en la red de distribución se basa en los ángulos de las fases si al tener un desequilibrio en las fases van hacer afectadas y el dispositivo es capaz de percibir esta variación y procede de la misma forma a compensar[27].

Se encuentra a los D-FACTS en los cuales tienen la facilidad de ir adaptando la cantidad de MVAs a compensar según sea la exigencia de la red, al compensar la potencia reactiva monitorea la inductancia del conductor de la red eléctrica al tener un desbalance el dispositivo detectara y procederá a la compensación según sea necesario por medio de la inductancia del conductor[5].

Por ultimo están los SVC que es un compensador estático de potencia reactiva ampliamente utilizado en los sistemas de transmisión, con un elemento de control de una válvula del tiristor en lo cual ellos se accionan simétricamente con un ángulo de control de 90° a 180° con respecto al voltaje del inductor dando un control inmediato en el nodo más débil del sistema a compensar, pero teniendo como desventaja sus elevados costos[22], [32]. En el desarrollo de este artículo se va a basar en el uso de los dispositivos SVC, ya por su velocidad de reacción a posibles fallas, al ser un dispositivo eficiente para el control dinámico de la potencia reactiva inyectada en un nodo en específico, con el objetivo de compensar un sistema eléctrico con estabilidad en los voltajes en cada nodo se debería ubicar un dispositivo SVC en cada nodo con carga en lo cual sus costos llegarían a ser demasiado elevados por ende se busca optimizar los costos logrando la estabilidad del sistema eléctrico, al ubicar los dispositivos SVC en las barras más necesarias en base a sus

costos logrando la estabilidad en todas los nodos del sistemas con costos considerables para la aplicación de este tipo de dispositivos, desarrollado por medio de la herramienta de optimización GAMS, minimizando costos y con restricciones de mejorar la estabilidad de voltaje y reducir las pérdidas en el sistema eléctrico beneficiando al usuario[33], [31], [34].

3. Formulación del Problema

Con el objetivo de optimizar los costos de instalación y de equipos SVC, con una ubicación óptima de los mismos se ha optado por el uso de un software muy poderoso que es el Sistema General de Modelaje Algebraico (GAMS, por sus siglas en inglés), en lo cual está diseñado para modelos lineales, no lineales y optimización mixta, GAMS tiene la facilidad de manejar complejos y extensos problemas de optimización donde los modelos son desarrollados, resueltos y a la vez documentados logrando en un solo modelado. La estructura básica de un modelo en GAMS es del siguiente conjuntos, datos, variables, ecuaciones, modelos y resultados optimizados, en la Figura 5 se tiene la estructura de solución de GAMS para obtener la optimización[33], [35].

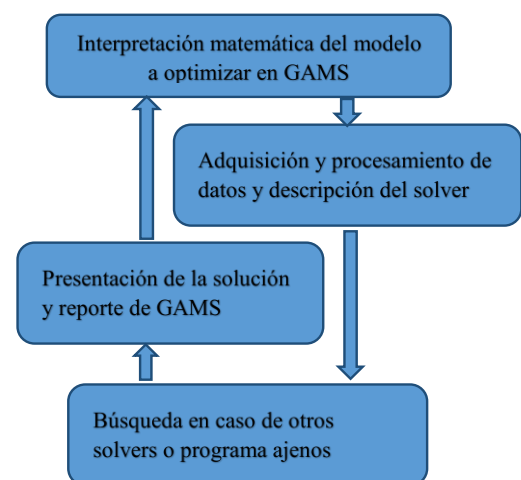


Figura 5. Modelado y proceso de una solución en GAMS.

Para el modelado matemático se formulara las ecuaciones objetivo y a la vez nuestras restricciones matemáticas para lograr la optimización en GAMS. Con la meta de minimizar los costos de instalación y los costos de los equipos SVC que se tiene representado en la figura 6, a la vez minimizar las perdidas eléctricas y el índice de desviación en los sistemas de distribución se han obtenido las siguientes funciones y objetivo con sus restricciones.

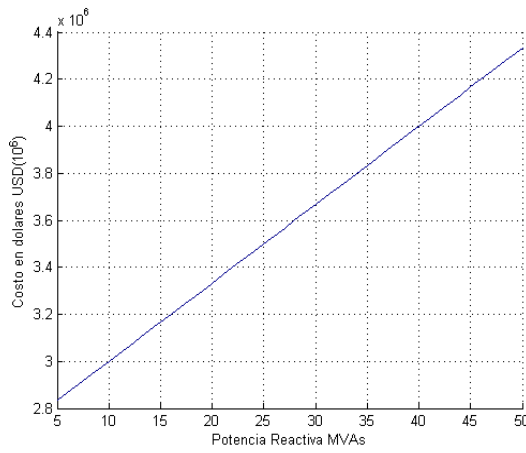


Figura 6. Función de costos de instalación y de equipos SVC.

Para la función objetivo de costos, se tiene en base a la cantidad de MVAs que el equipo SVC va a entregar al sistema y con los costos de instalación de este tipo de equipo en niveles de voltaje en general del SEP ya que los equipos SVC se van adaptando al voltaje según la línea eléctrica, la ecuación (1) se la obtiene de la figura 6 realizando una interpretación matemática del grafico[36], teniendo como ecuación (1) la siguiente:

$$C_{svc} = \left(\frac{100000}{3}\right) * MVA - \left(\frac{8000000}{3}\right) \quad (1)$$

Una vez obtenida la función de costos se formulara la función objetivo hacer ingresado en el optimizador GAMS, teniendo la ecuación (2).

$$\sum_{j=1}^n C_{svcj} * U_j = CT_{svc} \quad (2)$$

Donde los costos unitarios de cada equipo SVC está representado por C_{svcj} , este es multiplicado por una variable binaria U_j en la que es encargada de dar la ubicación óptima del equipo SVC basándose en las restricciones y en las demás funciones objetivo.

En la siguiente función objetivo se enfoca en la minimización de las pérdidas, donde está dada por la corriente y por la resistencia del conductor, donde las pérdidas totales es la sumatoria de todas las pérdidas del sistema teniendo la siguiente ecuación (3):

$$\sum_{j=1}^n I_j^2 * R_j \quad (3)$$

Donde n es el número total de nodos, I es la corriente en cada nodo j y R es la resistencia del conductor.

En el índice de desviación de tensión, lo óptimo es llegar a tener el menor valor posible en cual se busca la minimización del mismo. En todos los nodos se tiene un índice de desviación al sumar todo ellos se obtiene el índice de desviación total del sistema, donde se encuentra dado por la diferencia del voltaje del nodo actual menos el voltaje neto en aquel nodo teniendo como formulación matemática la siguiente ecuación (4)[5].

$$\sum_{j=1}^n V_j - V_{n_j} \quad (4)$$

Donde V_j es el voltaje actual en el nodo j y V_{n_j} es el voltaje neto en el nodo j .

Para las restricciones se han tomado en cuenta los límites de voltaje tanto inferior como superior sabiendo que debe estar dentro del margen del $\pm 10\%$ del voltaje nominal como lo dice la norma de la IEEE 1159 como valores máximos de voltaje para el sistema eléctrico logrando un correcto funcionamiento, de la misma forma la potencia reactiva del sistema encontrándose dentro de los límites

inferiores y superiores en el cual se encuentra configurado nuestro sistema como valores preliminares para la optimización correcta, de igual manera la potencia reactiva se debe encontrar dentro de sus límites del sistema, de esta manera se va a lograr una optimización de los valores con mayor precisión, a continuación se encuentra la ecuación (5) con la restricción de voltaje máximo y mínimo, la ecuación (6) con la restricción de potenciar reactiva con los valores mínimos y máximos, por último la ecuación (7) con la restricción de potencia activa con los valores mínimos y máximos, todo estos valores a ingresar en el optimizador.

$$\begin{aligned} V_{jmin} &\leq V_j \leq V_{jmax}(5) \\ Q_{jmin} &\leq Q_j \leq Q_{jmax}(6) \\ P_{jmin} &\leq P_j \leq P_{jmax}(7) \end{aligned}$$

Donde V_j es el voltaje en el nodo j , Q_j es la potencia reactiva en el nodo j por ultimo a P_j que es la potencia activa en el nodo j .

En el trabajo propuesto en [37], se tiene una optimización de la potencia reactiva en un SEP mejorando los perfiles de voltaje en base de la demanda con los costos variables del sistema sin ningún dispositivo en específico para la mejora de los perfiles de voltaje, tomando en cuenta que no se da una ubicación optima de la potencia reactiva en el sistema.

En el artículo mostrado en [38], realiza una compensación para la estabilidad de la tensión de un sistema a nivel de distribución tomando como elemento principal los bancos de capacitores, analizando restricciones técnicas como el factor de potencia y la variación permitida de la tensión.

Por ultimo en el trabajo propuesto en [39], se ha realizado una optimización con la ubicación de generación distribuida en un sistema de distribución

del tipo radial, en lo cual se busca la estabilidad de voltaje en el sistema compensado por generación las pérdidas para lograr la estabilidad del mismo, sin tomar en cuenta la potencia reactiva en el sistema para la compensación y estabilidad del voltaje.

Tomando en cuenta estos tres trabajos expuestos anteriormente se ha desarrollado este articulo con diferencia de haber realizado un análisis y una herramienta para el dimensionamiento y a la vez ubicación optima de los equipos FACTS SVC minimizando los costos, también minimizando las pérdidas en los sistemas eléctricos de potencia en general logrando la compensación de potencia reactiva estabilizando los voltajes en cada nodo a los menores costos posibles beneficiando al usuario siendo estos puntos los más importantes logrados en este documento.

Con el objetivo de simular se lo ha realizado en un circuito establecido de la IEEE de 14 barras que es un sistema normalizado que tiene las características de contar con 5 generadores síncronos donde 3 de ellos están configurados como compensadores síncronos, teniendo en paralelo a la barra 9 un banco de capacitores con un valor preliminar de 19 MVA, por último se encuentra a la barra 1 como barra slack usando como potencia base 100 MVA representado el diagrama en la siguiente figura 7.

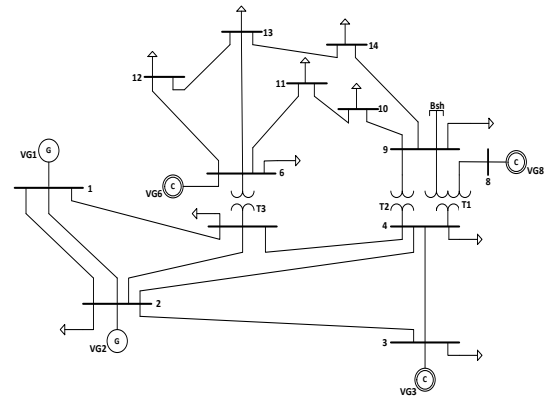


Figura 7. SEP IEEE 14 Barras.

Con estos antecedentes se ha logrado desarrollar el siguiente algoritmo presentado en la tabla 2, donde se ha aplicado en la herramienta GAMS, al tener ya formulado de forma matemática las funciones objetivo con las restricciones necesarias para el modelo a optimizar se tiene lo siguiente.

Tabla 1. Designación de variables para algoritmo.

Variables en algoritmo	
Variable	Descripción
Sb	Potencia base del SEP
Vmin	Límite inferior de voltaje del SEP
Vmax	Límite superior de voltaje del SEP
Msvc	Número máximo de equipos SVC
Pn	Potencia activa neta
Qn	Potencia reactiva neta
Vj	Voltaje en el nodo j
Idv	Indice de desviación de tensión
L	Perdida del SEP
CTsvc	Costo total de instalación y de equipos SVC
Csvc _j	Costo unitario de cada equipo SVC en el nodo j
Uj	Variable decisión para la ubicación de equipos SVC en el nodo j
Vj	Voltaje en cada nodo j
Vref _j	Voltaje de referencia inicial en cada nodo j

Tabla 2. Algoritmo para la optimización, dimensionamiento y ubicación de dispositivos SVC.

Algoritmo de optimización y ubicación de dispositivos SVC

Paso 1:

Define las variables escalares Sb, Vmin, Vmax, Msvc, descritas variables en tabla 1.

Set Generadores G= {G1, G2,..., G5}

Nodos N= {N1, N2,..., N14}, **ir a**

Paso 2

Paso 2: Designar las variables para el sistema Pn, Qn, Vj, Idv, L, Csvc_j y Uj, descritas variables en tabla 1, **ir a**

Paso 3

Paso 3: Funciones objetivo a minimizar.

FOR j = 1 to n (Nodos)

$$\sum_{j=1}^n Csvc_j * U_j = CTsvc$$

$$\sum_{j=1}^n I_j^2 * Rc_j = L$$

$$\sum_{j=1}^n V_j - Vref_j = Idv$$

, **ir a Paso 4**

Paso 4: Restricciones para la optimización.

FOR j = 1 to n (Nodos)

$$V_j \geq V_{jmin}$$

$$V_j \leq V_{jmax}$$

$$Q_j \geq Q_{jmin}$$

$$Q_j \leq Q_{jmax}$$

$$P_j \leq P_{jmin}$$

$$P_j \leq P_{jmax}$$

$$\sum_{j=1}^n U_j \leq Msvc$$

, **ir a Paso 5**

Paso 5: Designar el Solver para la optimización y que tipo de programación, utilizando la programación no lineal entera mixta MINLP.

MINLP = COINBONMIN (Solver), **ir a**

Paso 6

Paso 6: Presentar el reporte con los resultados de la optimización y ubicación de los dispositivos SVC

Paso 7: End.

4. Análisis de Resultados

Para el análisis de resultados que presenta algoritmo se ha simulado en tres escenas con un máximo de dispositivos SVC en el sistema de esta forma se podrá observar la variación de voltaje en cada nodo dado en pu, con motivos de análisis de los resultados primero se tendrá una simulación previa del flujo de potencia sin ningún equipo instalado en el sistema de esa manera observar los cambios de los valores al instalar los equipos SVC.

Como escenario preliminar para observar las variaciones de voltaje en un sistema sin compensación de potencia reactiva con los equipos SVC se tiene los siguientes valores de voltaje en pu en tabla 3.

En cada escenario se tendrá una comparación del sistema sin compensación y del sistema con compensación de equipos SVC, por motivo de un mejor análisis de los resultados.

Tabla 3. Vpu del sistema eléctrico sin compensación de equipos SVC.

Nodo	Vpu sin compensación
1	1.05
2	0.994
3	0.98
4	0.996
5	0.997
6	1.003
7	1
8	1
9	0.998
10	0.997
11	0.998
12	0.996
13	0.994
14	0.989

Con objeto de estudio se han establecido tres escenarios de esta forma apreciar las variaciones del voltaje con un número máximo de equipos SVC, es decir, al tener al escenario 1 con un solo equipo SVC de esa forma apreciar el comportamiento del sistema al instalar solo un equipo al saber si es o no capaz de compensar y abastecer al sistema completo de la misma forma se encuentra a los 2 escenarios más tomados arbitrariamente por objeto de estudio, al escenario 2 compensado con 4 dispositivos SVC por ultimo al escenario 3 con 6 dispositivos SVC. Primera escena, se tiene al sistema con un máximo de dispositivos SVC de 1

obteniendo los siguientes resultados mostrados en la tabla 4 y en la figura 8.

Tabla 4. Comparación de Vpu sin compensar y compensado con un dispositivo SVC.

Nodo	Vpu sin compensación	Vpu compensado con 1 SVC
1	1.05	1.05
2	0.994	0.994
3	0.98	0.98
4	0.996	0.996
5	0.997	0.997
6	1.003	1.003
7	1	1
8	1	1
9	0.998	0.998
10	0.997	0.997
11	0.998	0.998
12	0.996	0.996
13	0.994	0.994
14	0.989	0.989

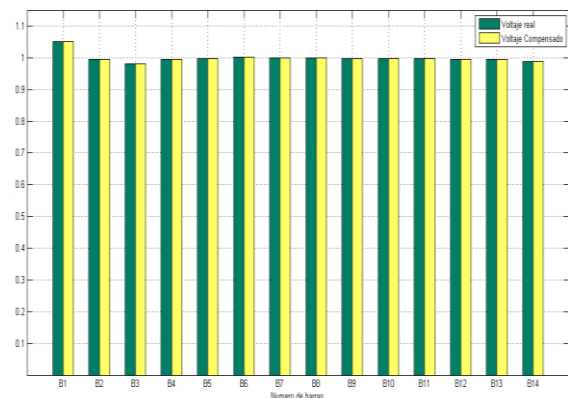


Figura 8. Vpu sin compensar vs Vpu compensado con un dispositivo SVC.

En este primer escenario como se puede apreciar con un solo dispositivo SVC no se ve variaciones de voltaje en la tabla 4 esto se debe al que el programa no encuentra el punto óptimo para ubicar al dispositivo ubicándolo en la barra slack donde no vemos variaciones de voltaje, por ende no vemos variaciones en la figura 8 en los voltajes en pu.

Segunda escena, en esta escenario se encuentra al sistema compensado con un máximo de 4 dispositivos SVC a continuación se tiene la tabla 5 de

comparación del Vpu sin compensar y ya compensado.

También la tabla 6 con la ubicación optima de los dispositivos y a la figura 10 con una comparación grafica de los Vpu por ultimo la figura 9 con la ubicación de los equipos SVC en el SEP.

Tabla 5. Comparación de Vpu sin compensar y compensado con 4 dispositivos SVC.

Nodo	Vpu sin compensación	Vpu compensado con 4 SVC
1	1.05	1.05
2	0.994	0.993
3	0.98	0.98
4	0.996	0.998
5	0.997	0.997
6	1.003	1.001
7	1	1
8	1	0.997
9	0.998	1
10	0.997	0.997
11	0.998	0.998
12	0.996	0.996
13	0.994	0.994
14	0.989	0.989

Tabla 6. Ubicación y cantidad de MVAs de dispositivos SVC con un máximo de 4 dispositivos.

Nodo	MVAs a compensar
1	0
2	10
3	0
4	20
5	0
6	0
7	0
8	0
9	10
10	0
11	0
12	0
13	0
14	0

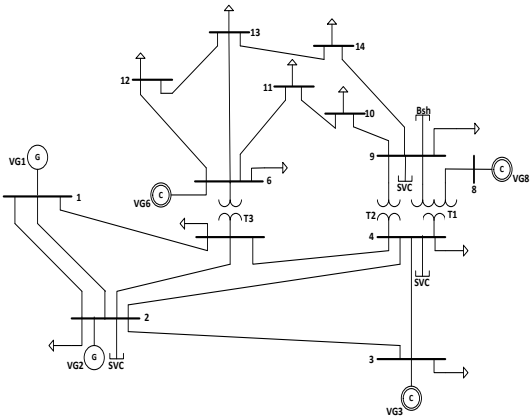


Figura 9. Sistema de la IEEE de 14 barras compensado con 4 dispositivos SVC.

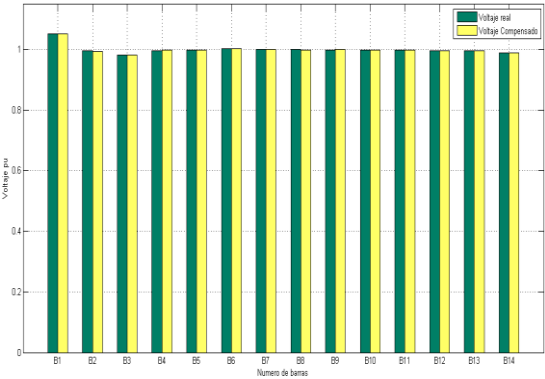


Figura 10. Vpu sin compensar vs Vpu compensado con 4 dispositivos SVC.

En el segundo escenario se tiene al sistema compensado en 3 barras con potencia reactiva estabilizando el voltaje a lo más parecido a 1 en todas las barras posibles, al tenerla ubicación de 3 equipos SVC se observa que no es necesario ubicar los 4 equipos SVC en el sistema ya que con ubicar 3 equipos SVC con la potencia reactiva indicada ya el sistema se ha logrado estabilizar en sus voltajes, además no se ve una mayor variación de los valores en la tabla 5 esto se debe por los niveles de voltaje que se tienen en el sistema, si se tuviera niveles de voltaje menores se podría apreciar las variaciones de voltaje con mayor margen, en la tabla 5 se ve una mejora de voltaje en las barras 4, 6, 9 llegando a su voltaje óptimo de funcionamiento en lo cual es el voltaje que más se acerque a la

unidad sabiendo que el voltaje esta dado en pu, para lograr mejorar se han instalado 3 dispositivos SVC en la barras 2, 4, 9 como lo muestra en la tabla 5 logrando mejorar los perfiles de voltaje en las barras 4, 6, 9 descritas anteriormente.

Tercera escena, en esta escena se tiene un límite de 6 dispositivos SVC para compensar el sistema a continuación se encuentra la tabla 7 que es la comparación del Vpu sin compensar y el compensado también está la tabla 8 donde se encuentra la ubicación y la potencia en las barras que necesitan de los SVC por último se tiene la figura 10 donde se encuentra un gráfico comparativo de los Vpu del sistema.

Tabla 7. Comparación de Vpu sin compensar y compensado con 6 dispositivos SVC.

Nodo	Vpu sin compensación	Vpu compensado con 6 SVC
1	1.05	1.05
2	0.994	0.993
3	0.98	0.98
4	0.996	0.998
5	0.997	0.999
6	1.003	1.001
7	1	0.999
8	1	0.996
9	0.998	0.999
10	0.997	1.003
11	0.998	0.998
12	0.996	0.996
13	0.994	0.994
14	0.989	0.989

Tabla 8. Ubicación y cantidad de MVAs compensado con 6 dispositivos SVC.

Nodo	MVAs a compensar
1	0
2	10
3	0
4	20
5	20
6	0
7	0
8	0
9	10
10	20

11	0
12	0
13	0
14	0

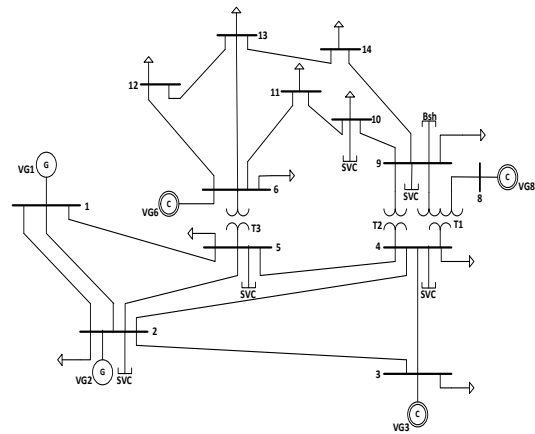


Figura 11. Sistema de la IEEE de 14 barras compensado con 6 dispositivos SVC.

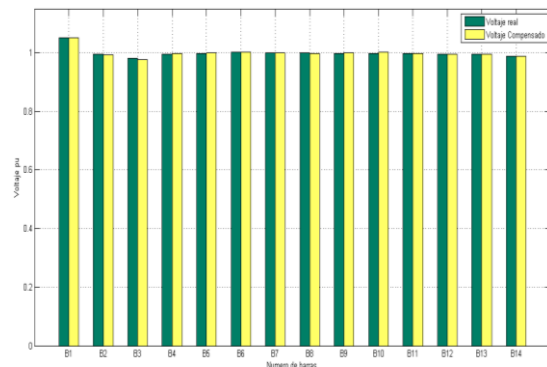


Figura 12. Vpu sin compensar vs Vpu compensado con 6 dispositivos SVC.

En este tercer escenario, se observa que el algoritmo formulado ha ubicado 5 dispositivos SVC siendo los necesarios para estabilizar el voltaje en los nodos logrando una aproximación más exacta a 1, sin tener la necesidad de instalar el número máximo de dispositivos SVC, donde se aprecia en la tabla 7 que las barras 4, 5, 6, 9, 10 se ha conseguido una mejora en los perfiles de voltaje bastante próxima a 1 en Vpu, al ubicar 5 dispositivos en las barras 2, 4, 5, 9, 10 como se aprecia en la tabla 8 con la cantidad de MVAs respectivo para cada barra se ha podido mejorar los niveles de

voltaje en las demás barras no solo en las barras que se encuentra ubicado el dispositivo SVC como tal se observa en la tabla 7 mejorando en las barras 4, 5, 6, 9, 10, y en la figura 12 se tiene un gráfico con las variaciones de V_{pu} del sistema sin compensar y compensado encontrando las variaciones en sus nodos.

Una vez analizados estas tres escenas se ha podido determinar el total de pérdidas en los sistemas teniendo mayores pérdidas en el sistema sin compensar y con menores perdidas en los sistemas ya compensados como se puede apreciar en la tabla 9, donde al tener unas pérdidas totales de 4.4829 en el sistema sin compensación logrando disminuir a 4.3861 en el sistema compensado con 6 dispositivos SVC, teniendo un total que ha disminuido de 0.0968, llegando al objetivo final de minimizar las pérdidas del sistema a los menores costos posibles beneficiando al usuario dando una confiabilidad al sistema eléctrico.

Tabla 9. Pérdidas eléctricas en los sistemas eléctricos sin compensación y con compensación.

Sistema eléctrico	Pérdidas eléctricas
Sin compensar	4,4829
Compensado con 1 dispositivo SVC	4,4816
Compensado con 4 dispositivo SVC	4,4191
Compensado con 6 dispositivo SVC	4,3861

5. Conclusiones

En este documento se da a conocer un modelo para la ubicación y dimensionamiento de dispositivos SVC, optimizando los costos y a la vez minimizando las pérdidas en el sistema, permitiendo ubicar y dimensionar con los menores costos posibles con la ayuda del optimizador GAMS tomando en cuenta los límites preestablecidos de voltaje y a la vez los límites de potencia reactiva a inyectar en el sistema.

Se han establecido varios escenarios para el análisis y comparación para la compensación de potencia reactiva desde un dispositivo SVC, con 4 dispositivos SVC y por ultimo con 6 dispositivos SVC, teniendo la comparación de pérdidas en el sistema con los distintos escenarios llegando a concluir que al tener un solo dispositivo SVC en el sistema no es capaz de compensar y estabilizar el sistema llegando al punto de no ser notorio en las perdidas del sistema, se tiene el sistema eléctrico compensado con 4 dispositivos SVC al ya verse reflejado en los valores de sus pérdidas pero no en gran cantidad como se desea ya que los perfiles de voltaje no se han estabilizado en todos sus nodos, por último se tiene al sistema compensado con 6 dispositivos SVC logrando tener las menores perdidas con respecto a los demás escenarios ubicando los dispositivos SVC en los nodos óptimos para lograr una compensación de potencia reactiva con mayor beneficio al sistema eléctrico, llegando al objetivo con los menores costos estabilizar y por ende entregar mayor confiabilidad para el usuario

6. Referencias

- [1] A. Aguila, D. Carrión, and L. Ortiz, "Analysis of power losses in the asymmetric construction of electric distribution systems," *Ieee Lat. Am. Trans.*, vol. 13, no. 7, pp. 2190–2194, 2015.
- [2] B. Mahdad, T. Bouktir, and K. Srairi, "Strategy of Location and Control of FACTS Devices for Enhancing Power Quality," *MELECON 2006 - 2006 IEEE Mediterr. Electrotech. Conf.*, pp. 1068–1072, 2006.
- [3] S. Xiaoguang, T. Wei, and Q. Huo, "Optimal configuration of multi-DFACTS joint operation in distributed network," *IEEE Transp. Electr. Conf. Expo*,

- ITEC Asia-Pacific 2014 - Conf. Proc.*, pp. 1–5, 2014.
- [4] V. Orejuela, D. Arias, and A. Aguila, “Response of Residential Electricity Demand Against Price Signals in Ecuador,” in *PROCEEDINGS of the 2015 IEEE Thirty Fifth Central American and Panama Convention*, 2015, no. Concapan XXXV, pp. 373–378.
- [5] J. E. Mendoza, R. A. Viveros, and D. A. Ruiz, “DFACTS en Redes de Distribución con Generación Distribuida,” pp. 1–7, 2009.
- [6] A. R. Jordehi, “Particle swarm optimisation (PSO) for allocation of FACTS devices in electric transmission systems: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 52, pp. 1260–1267, 2015.
- [7] B. Bhattacharyya and S. Kumar, “Reactive power planning with FACTS devices using gravitational search algorithm,” *Ain Shams Eng. J.*, vol. 6, no. 3, pp. 865–871, 2015.
- [8] B. Bhattacharyya and S. Raj, “Swarm intelligence based algorithms for reactive power planning with Flexible AC transmission system devices,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 78, pp. 158–164, 2016.
- [9] E. Ghahremani and I. Kamwa, “Optimal placement of multiple-type FACTS devices to maximize power system loadability using a generic graphical user interface,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 2, pp. 764–778, 2013.
- [10] J. Mutale and G. Strbac, “Transmission network reinforcement versus FACTS: an economic assessment,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 15, no. 3, pp. 961–967, 2000.
- [11] J. Olamaei, J. Javan, A. Yavartalab, and M. Khederzadeh, “Advanced control of FACTS devices for improving power quality regarding to wind farms,” *Energy Procedia*, vol. 14, pp. 298–303, 2012.
- [12] W. Ongsakul and P. Jirapong, “Optimal allocation of facts devices to enhance total transfer capability using evolutionary programming,” *Proc. - IEEE Int. Symp. Circuits Syst.*, pp. 4175–4178, 2005.
- [13] D. Torres Riascos, E. Inga Ortega, and A. Aguila Tellez, “Advanced metering infrastructure for microgeneration in rural zones using TV white spaces based on spectrum opportunistic,” *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 13, no. 12, pp. 3813–3819, 2015.
- [14] F. Castillo, A. Aguila, J. González, and S. Member, “Analysis of Stability of Tension and Losses of Electric Power in Distribution Networks with Distributed Generation,” vol. 14, no. 11, pp. 4491–4498, 2016.
- [15] D. Das, A. Prasai, R. G. Harley, and D. Divan, “Optimal Placement of Distributed Facts Devices in Power Networks Using Particle Swarm Optimization,” pp. 527–534, 2009.
- [16] J. J. Paserba, “How FACTS controllers-benefit AC transmission systems,” *2003 IEEE PES Transm. Distrib. Conf. Expo. (IEEE Cat. No.03CH37495)*, vol. 3, pp. 949–956, 2003.
- [17] V. Kakkar and N. K. Agarwal, “Recent trends on FACTS and

- D-FACTS,” *2010 Mod. Electr. Power Syst.*, pp. 1–8, 2010.
- [18] N. Palukuru, S. Halder nee Dey, T. Datta, and S. Paul, “Voltage stability assessment of a power system incorporating FACTS controllers using unique network equivalent,” *Ain Shams Eng. J.*, vol. 5, no. 1, pp. 103–111, 2013.
- [19] J. Preetha Roselyn, D. Devaraj, and S. S. Dash, “Multi-Objective Genetic Algorithm for voltage stability enhancement using rescheduling and FACTS devices,” *Ain Shams Eng. J.*, vol. 5, no. 3, pp. 789–801, 2014.
- [20] N. Holtsmark and M. Molinas, “Extending the reactive compensation range of a direct AC-AC FACTS device for offshore grids,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 89, pp. 183–190, 2012.
- [21] A. Mukherjee and V. Mukherjee, “Solution of optimal power flow with FACTS devices using a novel oppositional krill herd algorithm,” *Chaos Solitons & Fractals*, vol. 78, pp. 16–27, 2015.
- [22] R. Benabid, M. Boudour, and M. A. Abido, “Optimal location and setting of SVC and TCSC devices using non-dominated sorting particle swarm optimization,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 79, no. 12, pp. 1668–1677, 2009.
- [23] K. Ravi and M. Rajaram, “Optimal location of FACTS devices using Improved Particle Swarm Optimization,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 49, pp. 333–338, 2013.
- [24] E. Le Pelleter, P. O. Jeannin, D. Frey, and J. L. Schanen, “Multi-level converter dimensioning with structure and losses consideration for DFACTS applications,” *2007 Eur. Conf. Power Electron. Appl. EPE*, pp. 1–10, 2007.
- [25] R. Pérez, A. Aguila, and C. Vásquez, “Classification of the Status of the Voltage Supply in Induction Motors Using Support Vector Machines,” in *2016 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D)*, 2016, pp. 1–5.
- [26] M. Moghbel, S. Member, M. A. S. Masoum, S. Member, and S. Deilami, “Optimal Placement and Sizing of Multiple STATCOM in Distribution System to Improve Voltage Profile,” pp. 1–5, 2016.
- [27] M. Moghbel, S. Member, M. A. S. Masoum, and S. Member, “D-STATCOM Based on Hysteresis Current Control to Improve Voltage Profile of Distribution Systems with PV Solar Power,” pp. 1–5, 2016.
- [28] J. C. Das, “Application of STATCOM to an Industrial Distribution System Connected to a Weak Utility System,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 52, no. 6, pp. 5345–5354, 2016.
- [29] J. Mohammadi, G. Hug, and S. Kar, “On the behavior of responsive loads in the presence of DFACTS devices,” *2012 North Am. Power Symp. NAPS 2012*, pp. 1–6, 2012.
- [30] A. Savic and Z. Durisic, “Optimal sizing and location of SVC devices for improvement of voltage profile in distribution network with dispersed photovoltaic and wind power plants,” *Appl. Energy*, vol. 134, pp. 114–124, 2014.
- [31] B. Mahdad and K. Srairi, “Adaptive differential search

- algorithm for optimal location of distributed generation in the presence of SVC for power loss reduction in distribution system,” *Eng. Sci. Technol. an Int. J.*, 2016.
- [32] A. K. Pathak, M. P. Sharma, and M. Gupta, “Effect on Static and Dynamic Reactive Power in High Penetration Wind Power System with altering SVC Location,” *Power Syst. (ICPS), 2016 IEEE 6th Int. Conf.*, 2016.
 - [33] X. Li, “Encapsulating GAMS optimization function as web service,” in *ICETC 2010 - 2010 2nd International Conference on Education Technology and Computer*, 2010, vol. 1, pp. 298–301.
 - [34] J. S. Huang, Z. H. Jiang, and M. Negnevitsky, “Loadability of power systems and optimal SVC placement,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 45, no. 1, pp. 167–174, 2013.
 - [35] F. Benhamida, I. Ziane, S. Souag, Y. Salhi, and B. Dehiba, “A quadratic programming optimization for dynamic economic load dispatch: Comparison with GAMS,” *3rd Int. Conf. Syst. Control*, pp. 625–630, 2013.
 - [36] K. Habur and O. Donal, “FACTS – Flexible Alternating Current Transmission Systems For Cost Effective and Reliable Transmission of Electrical Energy Benefits of utilizing FACTS devices,” no. 1, pp. 1–11, 2008.
 - [37] D. A. S. Chavez, “Universidad Politécnica Salesiana Sede Quito, Optimizacion del uso de la potencia reactiva en el sistema electrica ecuatoriano mediante la programacion no lineal,” 2014.
 - [38] J. A. A. Trujillo, “Optimización multiobjetivo de los flujos de potencia en redes de distribución basado en el control VOLT-VAR.” 2017.
 - [39] A. C. Vasquez, “Optima ubicacion de fuentes de generacion distribuida basado en el perfil de tension de sistemas de distribucion electrica.” 2016.